先達からのお便り

材料と共に
～材料は愛おしい，材料学と医学の宿命，複合材料メゾメカニクス事始め，次代への期待～

京都大学名誉教授　落合庄治郎

1. はじめに

先達からのお便りの原稿依頼をいただき，歳月の過ぎ行く速さを実感しております．何を書こうかと悩みましたが，構造材料を例として，歳を取ってますます感じる材料への愛おしさ(第2章)，研究雑感：材料学と医学の宿命(第3章)，研究の思い出：複合材料メゾメカニクスを提唱したときの趣旨，苦労，問題点(第4章)，今後の研究への期待(第5章)を随想的にまとめてみました．現役世代の皆様にとっては，単なる老人の回顧文，妄想文かもしれません．筆者の希望としては，古希を越えてから，再度読んでいただければ幸いです．歳を取ることで共感いただける点が出てくるのではと存じます．また，現時点から再読時への時間の流れでの学問・技術の進歩，研究対象や手法の変化なども実感いただけるのではと思います．

2. 材料は愛おしい

金属，セラミック，ポリマー，複合材料など多彩な構造材料の組織観察，特性評価試験，解析，モデル化，シミュレーションなどを行ってきました．その結果，特に歳を取ってからは，物質・材料は本来的に壊れることを避けるように行動する，危険な状況になると，身を挺して防ごうとすると実感しています．金属を例にとると，応力が一定以上負荷されると，転位，双晶，変態等を生じさせ，応力を緩和することで，身を守ろうとしています．加工硬化は外力に対する抵抗力を上げています．セラミックでは，部分的に小さく壊れることでエネルギーを解放して，本体は壊れにくくしている例がかなり見られます．複合材料では，界面剥離で応力集中を軽減し，繊維架橋で一定程度外力を負担できるようにし，繊維プルアウト(引き抜け)などでエネルギー解放して，耐えようとしています．これらの現象を見ていますと，体に傷(生じた欠陥や傷ついた組織)は生じるが生命がなくなる(材料破断)には至らないように，一定の能力が与えられ，精一杯生きています．このような人間にも共通する姿を見るたびに，愛おしさを感じます．

愛おしさや共感を持つもう一例として，材料はその生き様から人間社会の特徴を見せていてくれるとも言えることを紹介します．後述(第3章)のように，筆者らは，「複合材料メゾメカニクス」研究を行い，繊維強化複合材の強度特性に及ぼすさまざまな因子の影響を調べてきました．得てきた結果は，やはり材料への思いを深くするものでした．多数の事例がありますが，ここでは，界面と複合材特性との関係を取り上げ，変形破壊挙動と人間社会との相関を記します．

繊維強化複合材料内では，繊維破断や界面剥離などのメゾ事象がバラツキをもって各所に生じ，負荷応力の増加と共に集積・成長しながら，相互に影響を及ぼしあって，全体としての挙動を決定します．そのプロセスでは，界面が多体間の相互作用に重要な役割を果たしています．

界面接着の強弱と複合材料特性の関係は，多様な個性の人間(民族，国)の協力現象(相互作用・多体問題)の結果生じる人間社会の特徴に通じるものがあります．例えば，文化や歴史の異なる国や人種の違いは衝突の一因となります．当事国間では憎悪を媒介として強い接着を持っているため，国境(界面)を越えて侵略(クラック伝播)に至る例はたくさんあります．衝突を避けるには，鎖国(関係を断ち切る：界面剥離)も候補になりますが，孤立すると国力は伸びません(低強度・低靭性しか得られません)．第3国に仲介を頼む(コーティング)あるいは当事国同士の交渉・親善(界面反応)が解決策候補ですが，度を過ぎると独自性(Identity)を失い，文化(繊維・マトリックスの固有の性質)が失われてしまいます．適切な国際外交(適切な界面制御)が必要です．過去・現在の政治や国際情勢に鑑みて示唆的です．このように人間社会と材料世界には共通感があり，その点でも，材料に強い共感が湧いてきます．

3. 材料学と医学の宿命

歳を取るにつれ，材料に愛おしさや共感をより強く感じるようになったこともあり，材料研究者・技術者は，材料の設計者，作製者および医者として，人間と材料との共生に貢献する役割・義務があると感じています．

材料が災難にあって，傷ついたり，破断したりした際に，組織を調べ，原因を突き止めることは，医療診断に例えられます．さらに，診断結果に基づき，材料が，より強靭に，より長く生きられるように材料設計を行うことは，処方箋つくりをしているとも言えます．材料には危機に曝されると一定の抵抗能力はありますが，能動的に危険を避ける機能も，自らの組織を最適化する機能もありません．そのため，平常時・非常時の点検・診断が，材料から，生き残れるように，あるいは次の世代がより強靭に生きられるように，人間に情報を知らせ，対応を依頼できる場になっています．

人間と材料との関係は，人間が設計・製造・設置・点検・診断・処方箋作成・修復・次世代設計して材料を支援し，材料が人間の安全社会の構築・維持を支援する共生の関係にあります．人間が材料に最適な材料組織を導入したり，稼働中に状況を診断して危機を避けたり，修復したりする役割を果たすことは，共生している人間と材料の共通の願いであり，人間の遂行すべき義務であると思います．

材料学も医学も，安全・安心社会を支える基盤です．壊れない，死者を出さないことが究極の目標ですので，社会的要

求や安心基準は極めて高度なものになり，研究スタートから社会実装までの時間は長くなります．構造材料では10年，20年かかる場合もあります．医学でも，治療薬の開発に10年以上かかる例も多数あります．材料学も医学も，社会基盤を支え，人命に直結するものだけに，社会実装には長期にわたる準備・点検・改善が求められる点が共通しています．安全性・信頼性を確立しなければならない点で，両学問は共通の宿命を背負っています．

しかしながら，この宿命は，社会的に理解・認知されているとは言えません．緊急の社会的要請に全力疾走で応えることはもちろん重要ですが，それとともに，大地震，大台風など(医学では突然変異ウイルス感染症など)の発生確率は低くても，いつかは必ず起こることを認識し，備えることも重要です．目の前の投資効率だけに拘泥せず，安全性・信頼性を極限まで追求することの重要性・必然性を社会全体で理解・共有し，緊急的な短期研究と極限追求型長期研究の両方に取り組めるシステムを構築していくことが望まれます．

筆者の個人的経験から，極限追求型長期研究が花開いたと実感した例を紹介します．炭素繊維強化ポリマー基複合材料(CFRP)は，既に40年前には先進国で製造されていました．私のドイツ宇宙航空研究所留学時(1979–1980)の研究テーマは，軽量・高強度の航空・宇宙材料として開発され，エアバスの垂直尾翼としての搭載が計画されていた積層型CFRPの破壊研究でした．当時ヨーロッパ諸国で積極的に研究が行われ，多くの研究者に会いましたが，みんな意気軒昂で，高揚した雰囲気の中で研究が進められていました．いい経験をさせてもらったと今も感謝しています．この材料は，様々な難関を突破し，1983年にエアバスの垂直尾翼として実装されました．

待ち望んでいたCFRPの実装が現実のものとなった1983年当時，多くの人がその後の飛行機へのCFRP搭載の急増を予測しました．しかしながら，そうはなりませんでした．そのようななかで，力学特性研究はもちろん，様々な部位や様々な作製段階での新たな材料プロセッシング研究等が地道に丹念に進められました．この努力が実り，今から10年前にボーイング787で重量比の50%以上にCFRPが使われるようになりました．この大量実装に至るまで，創成期から30年以上かかっています．振り返ってみると，CFRP応用が予想よりも進んでいなかった時代に，課題を抽出し，克服していった地道な研究の成果が現在の隆盛に繋がっています．新たなアイデアや技術を素早く進展させたいとだれもが願っていますが，そうはいかない場合が多いのが現実です．本例は，学問・技術の王道に則り，課題に真正面からじっくりと取り組むことが重要であることを示しています．

4. 複合材料メゾメカニクス事始め

繊維強化複合材料では，作製・使用中に高温に曝されると，ミクロのnmからマクロのmm, cmの長さ領域に至るメゾ領域(原子スケールのミクロと材料全体のマクロの中間長さ領域)で繊維とマトリックスの反応により界面にメゾスケール組織や欠陥が形成されます(**図1**(a))．負荷応力下での変形・破壊プロセスでは，繊維・マトリックスの種類・量や界面状態等によって異なりますが，繊維破断，繊維引き抜け，繊維橋掛け(架橋)，界面反応層破断，界面剥離，マトリックスの塑性変形やクラッキング等のメゾスケール力学事象が生じます(図1(b))．これらメゾ事象は，それぞれ独自の発生・成長機構を持ち，集積していくとともに，お互いに影響し合って複合材料全体の変形・破壊を進めていきます．この破壊プロセスには，構成材そのものの力学的性質(ヤング率，剛性率，降伏応力，靭性，強さとそのバラツキ，熱膨張率等)，界面状態(接着強さ，界面反応の有無・程度等)，幾何学的因子(繊維や界面反応生成物のサイズ・形態とそれらのバラツキ，空間的存在状態等)，さらに残留応力の有無や程度などが，影響します．

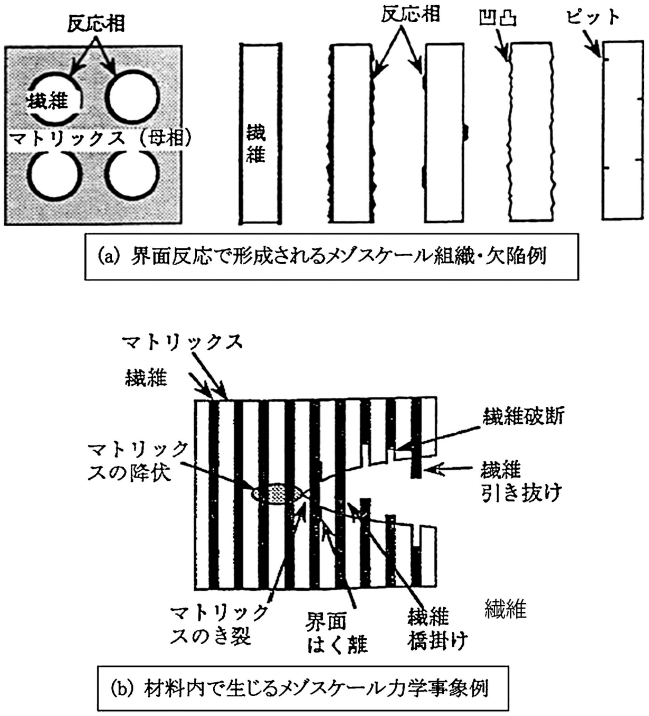

図1　繊維強化複合材料におけるメゾスケール事象例．

筆者らは，「メゾ事象の素過程」および「メゾ力学事象の集積・相互作用」の観点から，金属・金属間化合物・ポリマー・セラミックをマトリックスとする繊維強化複合材料の力学特性について，実験的に調査し，モデルを組み立て，シミュレーション法で再現することを通じて，体系的把握を目指してきました．そのなかで，上記コンセプト，手法，方向性を「複合材料メゾメカニクス」研究と名付け，1992年に京都大学に設立されたメゾ材料研究センターで研究を進めました．このコンセプトや研究結果を，論文や国際会議で発表したり，欧米の複合材料研究者の研究室で講演したりしたところ，“New Approach”，“Wonderfull”と好評だったことを思い出します．世界的にも早いメゾメカニクス研究の立ち上げであったと思います．

研究を始めたころは，計算や実験で得た原子レベルのミクロ域での情報をマクロ特性評価の計算やシミュレーションに

直接取り込める状況ではありませんでした．そこで，計算・シミュレーション方法については，以下のような工夫をしました．

メゾ事象の集積・協力現象の定量表現に向けて，シミュレーションでは，空間的に分布した多体問題を解ける計算法として，空間的にメッシュを切って位置情報を持たせた試験片を使って，NASAの数学者によって開発されたシェア　ラグ　アナリシス(Shear Lag Analysis　以下，SLAと略称)と呼ばれる方法における連立微分方程式を，差分方程式に変換して，用いました．なお，開発されたままのSLAでは，(1)繊維直径は一定，繊維配列は規則的な場合が取り上げてられており，実材料では必ず存在する繊維径や配列の不均一性が扱えない，(2)マトリックスは応力伝達媒体としてのみ働くとされ，繊維軸方向へのマトリックス応力は無視されていたため，ポリマーや極めて柔らかい金属がマトリックスの場合は良い近似として適用可でしたが，高強度金属やセラミックがマトリックスの場合は適用できない，残留応力が組み入れられない，などの応用上の制約がありました．筆者らはこれらの問題を解決した修正連立方程式と差分方程式を導出して使用しました．

計算・シミュレーションでは，各メゾ事象の発生，成長は，それぞれの閾値に達すると起こるとしました．与えられた試料負荷ひずみのもとで，試料内で局所的に1個のメゾ事象が発生または成長すると，再配分された試料全体の応力状態を求め，再配分応力状態下でその事象がさらにその局所で継続するか，他の局所で他のメゾ事象が発生あるいは成長するか，その変位ではそれ以上のメゾ事象の発生・成長は起こらないか等をその都度吟味し，起こる場合は発生毎に応力状態の再計算を行い，同様の吟味を繰り返しました．もちろん，プログラムなど販売されていませんので，計算やシミュレーションに用いたプログラムはすべて工夫しながら手作りしました．

開発した計算法，シミュレーション法で，金属基，セラミック基，ポリマー基の複合材の様々な作製条件下での変形破壊挙動，強度，破面形態が再現でき，さらに界面強度，界面反応，繊維への人工コーティングなどの影響もほぼ捕らえることができました．しかし，精度や効率性の向上をはじめ今後に残された課題も多くあります．今後の新たなコンセプトや手法の創出を期待しています．私個人としては，以下の5章で述べる課題の遂行に興味と期待を持っています．ぜひ挑戦していただきたいと存じます．

5. 残された課題，今後への期待

筆者らのメゾメカニクス計算・シミュレーションでは，変形・破壊プロセスに関与・貢献するメゾ事象(繊維破断，界面剥離，繊維引き抜けなど)が発生する長さ領域から，それらが成長，合体し，材料全体が破壊するまでを取り扱っています．組織の不均一さ・空間分布は，構成材(繊維・マトリックス)の強度の空間分布で置き換えています．例えば，繊維はその内部で不均一な組織や欠陥を有していますが，その影響は繊維強度のばらつき，複合材内での破壊位置に反映されます．そこで，様々な長さの多数の繊維試料の引張試験を行って，強度の分布関数(例えばワイブル分布)を得て，それとモンテカルロ法を使って強度の空間配備を行っています．こうすることで，力学計算法であるSLAが適用でき，メゾ事象の発生，成長，相互作用，試料全体の応力―ひずみ曲線およびマクロ特性を結び付けて表現できるようにしています．力学的見地からはこの方法でよい近似になっていることを確認しています．

しかし，材料学的には，ミクロ組織形成を出発点として変形・破壊を記述したいところです．今後，特に，原子レベルのミクロでの組織形成から界面反応層(数ナノメータから数ミクロン)や繊維径レベル(数ミクロンから数十ミクロン)の長さ領域での組織形成および上記各メゾ事象の発生の計算・シミュレーションができるようになれば，それをより大きなメゾスケールでの多体間相互作用を記述可能な例えば筆者らの計算・シミュレーション法と結合させれば，原子レベルのミクロからマクロな材料全体の力学特性の記述ができ，精度も高まります．研究の進展に期待しています．

メゾメカニクスでは，特に多体間相互作用の評価が重要と思っています．当時の評価法では，上述のように，メゾ事象が局所的に生じたり成長したりする毎に試料全体の応力の再配分を計算しています．そのため，計算やシミュレーションでは，膨大な時間がかかりました．試料毎に，また同一試料内でも局所毎に，不均一性の状況は異なっています．不均一性に由来する多体間相互作用とその材料特性値に及ぼす影響の評価には，試料全体のシミュレーションをやるしかないと判断し，異なる乱数列を使って，異なる不均一性を内部に持たせた多数の試料を用いました．この問題は，以下の統計課題と通底しています．

構造材料としての複合材料は建物，自動車，飛行機，宇宙船等に使われ，人間社会に貢献しています．今後とも，人間社会が希求している「高安全・高信頼社会構築」に向けて，さらなる高性能材料の創発と応用が期待されています．そのなかでは，強度や靭性などの特性の向上はもちろん，安全性を保障する材料を作ることが求められています．材料の組織・特性は均一ではありません．程度の差はあれ，必ず不均一になっています．特性値の平均値が著しく上がっても，分布幅が大きいと，安全とは言えません．平均値を上げることは必要条件ですが，十分条件ではありません．

強度を決める因子等はずいぶん研究されてきましたが，組織の不均一性と強度の不均一性の関係を原理から記述するには至っていません．統計的表現法，多体間相互作用計算への統計情報のインプット法，試料サイズの決め方など，開拓が必要です．組織中での元素やクラスターの種類，サイズ，量，存在位置は試料内で異なり，また，その分布状態は試料ごとに異なりますので，大変な仕事になりますが，是非，この課題を解決する方法を開拓し，安全性・信頼性をも予測できるようにして欲しいと願っています．これが可能になると画期的な進展です．挑戦に期待しています．

(2020年5月18日受理)[doi:10.2320/materia.59.438]